

精進低空風切觀測及預報作業方式探討-以馬公機場為例

劉振甫¹、高志杰²、何應賢³

¹ 國防大學空軍指揮參謀學院

² 空軍氣象聯隊第七天氣中心

³ 國防大學空軍指揮參謀學院

摘要

低空風切對飛航安全影響甚鉅，即使各類觀測儀器不斷發展，氣象人員對其掌握程度依然有限，更遑論迄今仍未架設先進低空風切觀測設備的機場。

本文以馬公機場為研究對象，針對其近10年METAR/SPECI電碼編報低空風切之資料進行統計分析，歸納出容易引發馬公機場出現低空風切之天氣系統，及其發生時之風場分布特徵，再輔以實際天氣個案進行分析探討；所得結論與建議期能作為未來馬公機場針對低空風切預報及觀測作業精進之參考。

關鍵字：低空風切、馬公機場、天氣預報

壹、前言

2014年7月23日晚間，復興航空222號班機由高雄小港國際機場啟程飛往澎湖馬公機場，當時雖然適逢「麥德姆」颱風澎湖地區警報解除，但其後所挾帶之廣大雲雨帶仍籠罩馬公機場。飛機在降落時因風雨過大無法目視跑道選擇重飛，卻在重飛過程中撞擊樹林及住宅，造成機上48人死亡、10人受傷，並另外波及11棟民宅，肇致地面5人輕傷的慘劇，此一經過被稱為「復興航空222

號班機空難」事件；2016年1月29日，飛安會公布本起事故調查報告，雖然將此意外歸因於飛航組員未遵守標準作業程序，但在調查初期，交通部民航局曾初步判定為飛機在重飛階段遭受低空垂直風切（或下爆氣流）影響，使飛機因升力不足以致失速墜毀。

除復航222號班機事件外，回顧國內外航空史，可以發現多起經觀測資料證實，或疑似因低空風切所造成的飛安事件（摘錄部分事故如表1），因此，低空風切對於飛航安

全的危害程度可見一斑；另就軍事作戰角度而言，若臺海發生戰役，我第一要務便是奪取制空權以獲得戰場優勢，因此，空軍氣象作業人員必須隨時提供飛行員最新天氣情資，並對其可能遭遇之危險天氣因子提出預警，及早採取因應作法以降低非戰之損。有鑑於低空風切對飛安危害甚鉅，氣象聯隊若能增進對於低空風切之預測報作業能力，就能使戰機飛航安全多一層保障，降低我空軍作戰風險，進而有效發揚空中火力。

本研究探討對象為馬公軍民合用機場，研究資料以METAR/SPECI電碼為主，並挑選近年實際發生之天氣個案進行分析與探討，預期可得知造成馬公機場出現低空風切主要天氣系統、發生低空風切時風場分布特徵，及所挑選個案之演變過程，以作為未來馬公地區觀測及預報低空風切之參考依據。

貳、資料來源與研究方法

蒐集馬公機場近10(2009~2018)年METAR/SPECI資料，篩選出附加電碼中有編報低空風切者，並對照氣象中心發布之「月長期天氣預報(暨月氣候監測)」，得知各低空風切個案發生時之天氣系統(註：為避免天氣系統態樣過於複雜造成統計困難，本研究將先行依據各系統對馬公地區影響之特徵，簡化歸類為數種主要天氣「類型」)，再利用EXCEL軟體內建「雷達圖」及「直條圖」功能，分別繪製不同天氣類型下發生低

空風切時之「風向」及「風速」圖，瞭解其各別之風場分布特徵；最後，從中挑選近期具代表性之個案，針對其GrADS環境場、JMA預測圖、METAR/SPECI及探空風場等資料進行分析比較。

參、馬公機場近10年METAR/SPECI低空風切資料統計結果

各風切個案及其對應之天氣系統詳如表2所示，統計結果概述如次：

馬公機場近10(2009~2018)年底空風切個案共計38個，其中「東北季風」類型22個(佔57.89%)、「颱風(熱帶低壓)」類型9個(佔23.68%)、「鋒面」類型4個(佔10.53%)、「其他(屬上列3類以外，或由上列3類天氣類型中任2類同時影響者均屬之)」類型3個(佔7.9%)。

此外，在該期間內馬公機場METAR/SPECI電碼共計16萬9,644筆，附加電碼編報低空風切之資料總筆數計393筆(僅佔該期間電碼總筆數約0.23%)；其中屬「東北季風」天氣類型者計210筆，佔風切資料總筆數53.44%；屬「颱風(熱帶低壓)」天氣類型者計149筆，佔風切資料總筆數37.91%；屬「鋒面」天氣類型者計16筆，佔風切資料總筆數4.07%；屬「其他」天氣類型者計18筆，佔風切資料總筆數4.58%。

另各天氣類型與對應之地面風場統計結

果將分別以「地面風向對應出現風切資料筆數分布圖」及「地面平均風速對應出現風切資料筆數分布圖」表示（前者沿圓周方向之曲線為 360° 風向座標，沿徑方向輻射向外之直線為出現風切資料筆數之座標；後者橫軸為風速（kts），縱軸為出現資料之筆數，詳見圖1至4；另本研究未將陣風資料納入統計），所見特徵分述如後：

一、「東北季風」類型（如圖1）：

在此類型個案中，地面風風向均集中在 360 至 040 間；其中，以 020 及 030 方向出現比率最高（分別出現 103 筆及 75 筆），佔該類型資料總筆數 84.76% 。此外，其平均風速分布之範圍為 11 至 36 kts，在 26 kts處出現風切資料筆數之極大值（ 24 筆），並向兩側遞減呈現猶如常態分布之鐘型外觀。

以澎湖地區地理環境而言，其位處臺灣海峽中部。因海面與鄰近地形間高度的落差，使臺灣海峽形成一個以東西兩側地形為管壁、內側海峽為管道，且南北開口寬廣、中間通道緊縮，有如「狹管」一般的地理環境；由於流體運動的連續性，致使東北季風自海峽北部向南吹入、穿過突然緊縮的臺灣海峽後風速遽增。

雖然澎湖位於較接近海峽南側之寬廣開口處，但因東北季風加速後的慣性運動、海面摩擦力較小，及其缺乏地形屏障等因素，使得澎湖地區在東北季風的天氣類型下，經

常受到強風的吹拂，如此底層風場的驟變易引起低空風切現象的發生。

二、「颱風（熱帶低壓）」類型（如圖2）：

在此類型個案中，其地面風風向多為集中自 320 至 030 間之偏北風（共計 124 筆，佔該類型資料總筆數 83.22% ；其中以 360 方向風場為最，計有 55 筆，佔該類型資料總筆數 36.91% ），次為自 150 至 210 間之偏南風（共計 22 筆，佔該類型資料總筆數 14.77% ），餘 3 筆（僅佔該類型資料總筆數 2.01% ）為 280 至 310 之西風分量較明顯的風場。

一般而言，在沒有其他綜觀尺度天氣系統明顯影響下，當颱風（熱帶低壓）接近某處時，該處之風場即由颱風（熱帶低壓）環流直接決定；因此，從颱風（熱帶低壓）接近到遠離的過程中，某處的風場經常隨颱風（熱帶低壓）移動路徑及與其相對位置而有非常劇烈之變化；再加上當地環境與地形影響時，情況就變得十分複雜。

由於臺灣海峽地形狀似一南北向開口之狹管，因此通常除了當颱風（熱帶低壓）中心位在澎湖地區北（南）側附近時會出現偏西（東）方向之地面風場外，多半為偏南及偏北方向風場，從圖2（a）概可窺見此一特徵。

至於在地面吹偏西風情況下產生低空風切之個案，經查為 2018 年 8 月份造成中南部

嚴重水患的熱帶低壓所致。推測低空風切可能由隱含在其中的中小尺度對流系統所引發；此外，在所有颱風（熱帶低壓）類型個案中，未見馬公機場在地面吹偏東風之環境下產生低空風切，推測可能因中央山脈地形阻擋，使得底層東風風場勢力減弱而無法造成顯著之風切變。

在風速部分，其平均風速分布之範圍為8至33kts，並在24kts處出現風切資料筆數之極大值（12筆）。在此需要注意的是，雖然熱帶氣旋在中心平均風速達25 kts時稱為熱帶低壓、達34 kts以上時稱為颱風，但在此類個案中，由未達25kts風速引發低空風切之資料筆數（94筆）佔總筆數（149筆）63.09%，顯示在颱風（熱帶低壓）接近、影響及遠離過程中，所測得地面風速大小並未與風切發生比率呈現明顯正相關性。

三、「鋒面」類型（如圖3）：

在此類型個案中，其地面風風向主要區分為「北至東北風」以及「西南風」兩類。「北至東北風」（360至040方向）資料共計13筆，佔該類型資料總筆數81.25%，「西南風」（210方向）資料共計3筆，佔該類型資料總筆數18.75%。

其中地面風向為「西南風」之個案，乃受滯留鋒面影響而發生低空風切，其餘地面風向為「北至東北風」之個案均由鋒面接近、鋒面影響及鋒面通過等類天氣系統造

成。

經對照本類型個案METAR/SPECI電碼之風場及天氣現象變化，推測當一般冷鋒鋒面過境時，「鋒面伴隨降雨」及「鋒後東北風勢力增強」為造成低空風切發生之主因；而在滯留鋒面天氣系統影響下發生之低空風切，應與鋒前激發之對流系統有關。依此，一般冷鋒鋒面與滯留鋒面在引發低空風切在機制上是有所差異的。

此外，其平均風速分布範圍為12至30kts，並在14kts處出現風切資料筆數之極大值（4筆），且風速數值亦多落在14kts前後；唯因此類型資料筆數較少（僅共16筆），難以窺見其統計上明顯分布特徵。

四、「其他」類型（如圖4）：

在此類型個案中，其地面風風向出現次數仍以350至030方向的偏北風為主（計15筆，佔該類型總筆數83.33%），其中以030方向為最（計11筆，佔該類型總筆數61.11%），其餘為100方向資料2筆（佔該類型總筆數11.11%）、150方向資料1筆（佔該類型總筆數5.56%）。

以北風為主之個案有二，一為2018年6月15日「滯留鋒面及熱帶低壓外圍環流」，另一為2018年11月1日「東北季風及颱風外圍環流」。

就前一個案來看，當時天氣系統配置概

況為有一存在多日的滯留鋒面，其中心位於日本東方洋面，鋒面自此向西南方向延伸數千公里至巴士海峽一帶，形成一個範圍廣大的低壓帶；熱帶低壓處於鋒面尾端低壓區範圍內，並自臺灣海峽南部以東北東方向持續朝臺灣接近；依此，預報當日天氣系統為「滯留鋒面及熱帶低壓外圍環流」。

事實上，滯留鋒面尾端並未北抬直接影響臺灣地區，且熱帶低壓中心已於當日0900時登陸臺灣南部，造成後續臺灣西半部及澎湖地區均受其逆時針環流影響而呈現偏北風狀態，似與前乙類受「颱風（熱帶低壓）」天氣類型影響之個案相仿。

就後一個案來看，雖然當日影響臺灣地區之天氣系統為「東北季風及颱風外圍環流」，但在馬公機場發生低空風切時，玉兔颱風位於其西南方超過500公里（颱風七級風暴風半徑僅180公里），且強度已減弱為輕颱並在北轉過程中因北方較為乾冷空氣的影響而迅速減弱；因此，在本個案中，「東北季風」仍為主導臺灣及澎湖地區之天氣系統。

2018年5月5日，是馬公機場近10年中唯一一個在「偏南氣流」天氣系統影響下發生低空風切的個案。發生低空風切當時之地面風速十分微弱，且風向在150至350間擺盪；本研究預將此例納入後續個案探討，以進行相關分析研究。

至於在風速分布特徵方面，因偏南氣流天氣系統原就明顯較前兩個案天氣系統之風速來得低，因此在偏南氣流影響下的風速僅1至2 kt (s)，其餘兩個案風速均超過20 kts。

肆、相關天氣個案分析與討論

依上述統計結果，由「東北季風」天氣類型造成低空風切之個案佔所有個案之比率高達57.89%，且在22個「東北季風」類型個案中，未發生降雨之個案計有16個，佔該類型個案72.73%；也就是說，馬公機場近10年發生低空風切的個案中，有42.1%的比率是由「未伴隨降雨的『東北季風』」天氣類型所造成。

有鑑於此，本研究將挑選未發生降雨之東北季風天氣系統個案乙例，以提升分析結果在未來運用上之效益；另為使所分析氣象產品貼近現今作業模式，及考慮相關資料取得難易程度，故挑選發生時間距離目前時間最接近之個案（選定2017年11月4日東北季風個案作為研究對象）；此外，針對前節所提，唯一一個受「偏南氣流」天氣系統影響下發生低空風切之個案（2018年5月5日）亦被列入個案探討對象，期能由兩發生比率極端個案之角度出發，發現箇中之普遍性與特殊性。上列個案分析說明如次（文中時間除特別說明外，均為「地方時」時間）：

一、2017年11月4日「東北季風」個案：

(一)低空風切發生情況：

依METAR/SPECI電碼，當日低空風切自10時48分開始發生，之後每筆整、半點資料均有編報WS ALL RWY附加電碼至23時05分結束，持續時間長達12小時17分鐘。

(二) 大氣環境場分析：

1.地面天氣圖（如圖5）：

2017年11月4日08時，高壓中心位於山東省，臺灣地區由北至南處在1023、1020及1017hPa三條等壓線範圍內；位在東海一帶的東北季風在進入臺灣海峽前，風速約為30~35kts，在進入臺灣海峽後風速漸次上升（海峽北部風速約40~45kts、海峽中部風速最高為50kts），海峽南部風速雖略下降，仍普遍達35kts（如圖5（a））。

同日20時，高壓中心恰向東移入黃海，且1026hPa等壓線南壓至北部外海，造成臺灣地區氣壓梯度上升；海峽中部最高風速50kts，且海峽中南部風速普遍增至40kts（如圖5（b））。

承上，自個案發生當日08至20時，海峽一帶地面風場受氣壓梯度上升影響，造成風速一定程度的增強。

2.1000hPa天氣圖（如圖6）：

由於國際民航組織規定「低空風切」是指發生在地面至500公尺（1,600呎）高度間

的風切現象，因此，本研究亦選取個案發生當日臺灣地區1000hPa天氣圖進行分析（依當日探空資料顯示，1000hPa高度約為150公尺）。

將本個案1000hPa與地面天氣圖風場作一比較，前者除在部分網格點上之風速較後者略大（主要受地面摩擦影響程度較小所致），且風向上有些微差異外，餘配置情況均與後者相仿；因此，自個案發生當日08時至20時，海峽一帶1000hPa風速亦有一定程度的增強。

(三)數值預報資料分析：

採用日本氣象廳（JMA）2017年11月3日1200UTC初始場資料繪製之地面數值預報圖（如圖7；分別預測未來12、18、24及30小時臺灣及週邊地區天氣情況）。

比較自2017年11月4日08時（圖7（a））至11月5日02時（圖7（d））期間內預測圖，可以發現臺灣及其週邊地區氣壓梯度自當日08時後有上升趨勢，14時（圖7（b））達到最高（同時馬公地區週邊網格點風速亦達相對最大值），並在20時後開始遞減。

由此個案顯示，雖然JMA模式對於當日風速減弱時機的預測與實際情況略有落差（預測情況：08至14時風速增加，隨後為減弱趨勢；實際情況：08至20時風速呈增加趨勢），但其仍大致掌握到了東北季風類型下臺灣

海峽風速增強的情況。

(四)風場觀測資料分析：

1.METAR/SPECI：

為瞭解本個案低空風切發生前後METAR/SPECI地面風場變化情況並濾除短時間變化波動，將每筆風場資料以簡單移動平均（取前2筆、後2筆，加上自身1筆資料的算術平均值）方式呈現（發生前、中、後分別截取相同筆數之資料，分析時段自106年11月3日1930時至11月5日1300時），所得結果概述如次：

(1)風向：擺幅均在020至030之間。

(2)風速（如圖8）：

平均風速之簡單移動平均值均在23kts以上，於低空風切發生前呈現顯著上升趨勢，在低空風切發生同時達到第一次鋒值（35kts），並在歷經數次鋒值之後呈現緩慢下降趨勢，當下降至30kts以下，低空風切現象亦隨之消失。

(3)陣風：變化趨勢與風速變化趨勢相同。

2.探空資料：

針對2017年11月4日0800時及2000時探空風場進行分析比較，相關作法說明如后（所得結果詳如表3）：

(1)僅擷取500公尺（約1,600呎）以下低空資

料（0800時計47筆，2000時計37筆）。

(2)計算每100公尺高度風向、風速算術平均值，代表該空層之平均風向（速）。

(3)該兩時間點METAR地面風場資料亦列入考量。

比較個案發生當日前後兩筆探空資料，前者自地面至500公尺高度間風向擺幅為10°，風速每上升100公尺約增加5kts；後者平均風向僅有5°擺幅，且在300公尺以下風速隨高度增加幅度較前者明顯（共計增加15kts）。

當飛機以020跑道方向起降時（馬公機場跑道方向為020-200），在後者情況下會遭遇到較明顯之風速增減量；因此，飛行員極有可能向塔台回報有低空風切的存在。

(五)小結：

研判「東北季風風速增強」是造成本個案低空風切發生的原因。在數值模式表現方面，JMA確能掌握到地面氣壓梯度變化情況及風速增強趨勢，唯在風速減弱時機上與實際情況存在數小時落差；而透過METAR/SPECI地面風場簡單移動平均，可以發現低空風切發生（消失）之時機與地面風速增強（減弱）趨勢具有高度關聯性。此外，藉由探空觀測資料分析，得知在低空風切存在情況下，底層東北季風風速隨高度上升有較為明顯之增量。

二、2018年5月5日「偏南氣流」個案：

(一)低空風切發生情況：

依METAR/SPECI電碼，當日低空風切自15時32分開始發生，之後每筆整、半點資料均有編報WS ALL RWY附加電碼至17時43分結束，持續時間2小時11分鐘。

(二)大氣環境場分析：

1.地面天氣圖（如圖9）：

2018年5月5日08時，太平洋高壓中心位於日本南方洋面，臺灣地區位於其西南象限，東部海域主要為東南至偏南風、巴士海峽為偏東風；臺灣海峽一帶位處背風面，自東側繞流而至的氣流在海峽北部形成一逆時針旋轉的背風渦旋，馬公附近網格點風場以微弱偏北風及東北風為主（圖9（a））。

同日20時，太平洋高壓東退，致使海峽北部繞流現象消失，而在海峽南部形成一順時針旋轉之背風渦旋，馬公附近網格點或有微弱偏西及偏南風場的存在（圖9（b））。

承上，個案發生時間介於海峽一帶地面風場變化時期，造成風向一定程度的轉變（馬公機場附近網格點風速微弱，均在10kts（含）以下）。

2.1000hPa天氣圖（如圖10）：

本個案發生當日臺灣地區之1000hPa天氣圖如圖10所示（依當日探空資料顯示，

1000hPa高度約為140公尺）。

將本個案1000hPa與地面天氣圖風場作一比較，兩者同樣除在部分網格點上之風向與風速有些微差異外，餘配置情況均相仿；因此，在個案發生期間，海峽一帶1000hPa風向亦有一定程度的轉變（馬公機場附近網格點風速微弱，均在10kts（含）以下）。

(三)數值預報資料分析：

採用JMA2018年5月4日1200UTC初始場資料繪製之地面數值預報圖（如圖11；分別預測未來12、18及24小時臺灣及週邊地區天氣情況）。

模式預測等壓線分布及變化情況、臺灣及其週邊風場配置情況與實際大致相符，且亦掌握到當日0800及2000時分別發生在海峽北部及海峽南部的背風渦旋現象，唯預測0800時背風渦旋中心位置較實際略為偏北，導致馬公及其週邊地區在預測風場與實際風場間存在較大誤差（預測風場：微弱偏南風；實際風場：微弱偏北風）。

(四)風場觀測資料分析：

1.METAR/SPECI：

因本個案出現低空風切資料筆數較少（僅有5筆），遂將分析時段延長自同日0800時至隔日0800時，以藉由觀察長時間風場演變，探討其與本個案低空風切間之關聯（所得結果概述如次）。

(1)風向：在所分析時段內，風向歷經數階段變化。

a.11月5日0800時至1200時，風向由偏北風轉為偏東風。

b.12時30分後轉回偏北風，並持續至1500時。

c.15時30分出現短暫靜風後，15時32分開始發生低空風切，並於17時43分消失（此期間內風向在150至350之間擺盪）。

d.穩定的南風風場於5月6日0400時開始建立，在這之前歷經了約7個小時的靜風狀態。

(2)風速：分析期間風速微弱，均在7kts（含）以下。

(3)陣風：分析期間內均無編報陣風。

2.探空資料：

針對2018年5月5日0800時及2000時探空風場進行分析比較（相關作法與前一個案相同；0800時資料計46筆，2000時資料計44筆），所得結果詳如表4。

比較個案發生當日前後兩筆探空資料，前者風向自地面起隨高度上升逆轉（由偏北風轉為偏西風，轉幅 90° ），風速在400公尺以下隨高度上升漸次減弱；後者風向亦隨高度上升逆轉（由西北風轉為偏南風，轉幅 110° ），然其風速以大約每100公尺2kts的量級隨高度向上增加。

雖然低空風切發生時無探空資料可稽，

但比較本個案發生當日前後兩筆探空資料可以發現，500公尺以下空層風向正在經歷顯著變化（由北風分量為主轉為南風分量明顯增強），且後者有隨高度上升南風分量增大趨勢。

若飛機以020跑道在上述風場轉變過程中進行起飛，就很有可能因為南風分量隨時間及高度的增強造成其升力下降，而向塔台回報有低空風切的存在。

(五)小結：

雖然偏南氣流為影響本個案之主要天氣系統，但馬公地區實際上是因為背風渦旋發生位置的變化而導致風場上的轉變。研判南北風場的轉換是造成本個案低空風切之主因（METAR/SPECI地面風場及探空資料均可發現此一轉變）；而JMA地面圖未能準確預測海峽一帶此一現象的發生，可能是受到模式解析度限制所致。

伍、低空風切觀測及預報作業方式改善作法之探討

一、觀測作業方面：

依據馬公機場過去10年（2009-2018年）METAR/SPECI電碼，由「鋒面」天氣類型造成低空風切之資料中，幾乎均有降雨發生；由「颱風（熱帶低壓）」天氣類型造成低空風切之個案中，除2015年7月11日「颱風環流遠離」及2015年9月28日「颱風環流」

兩個案發生低空風切時無降雨外，其他個案期間內均有（視區）降雨情況發生。

承上，對馬公機場而言，在「鋒面」及「颱風（熱帶低壓）」天氣類型影響下，因低空風切發生時大多伴隨有降雨現象存，故都卜勒氣象雷達應可發揮其徑向風場觀測功能，由其反演出之低空風切產品亦可供作業人員參考。

但對於人員長期短缺的馬公天氣中心而言，已無法維持雷達班席位經常性全時運作，導致當低空風切發生時往往難以第一時間偵知並主動對外發布警告，多是被動接收塔台轉航機通知後始編寫電碼發報，無法有效發揮裝備所長。

鑑此，若能透過程式編寫，將雷達產製之低空風切產品原始碼依航機所能承受限度設定警報閾值，凡有高於該數值情況，即刻透過專用顯示窗口主動向天氣室作業人員發出警告，如此可以減輕值勤人員經常查看並確認有無低空風切現象之負擔，預留更多裕度予預報長（或氣象官）依個人專業進行判斷並妥善執行後續因應作為。

但即使雷達偵掃到降水回波的存在，若其涵蓋範圍過小，亦無法推算出其範圍外當下的風切情況；更何況根據METAR/SPECI資料顯示，過去10年內38個低空風切個案中，就有20個並未伴隨降雨現象的發生（佔所有個案52.63%），因此都卜勒氣象雷達對

於低空風切的觀測能力仍十分有限。未來為了能更準確即時地觀測到低空風切現象的發生，引進更合適的觀測設備已成為不可避免的趨勢。

氣象聯隊於2016年採購4部車載雷射式剖風儀觀測系統（可提供高度5,000公尺以下，高時間及空間解析度之立體風場資料），此後便不斷精進掃描策略並強化人員教育訓練。目前剖風儀雖未配予馬公機場使用，但未來在其相關作業臻至成熟後，若有機會能支援馬公機場，相信對其低空風切的觀測可提供莫大程度的幫助。

然針對低空風切的觀測與警報發布作業，現行最為先進的設備為美國聯邦航空總署（FAA）所開發的低空風切警報系統（LowLevel Wind-Shear Alert System, LLWAS），其可即時計算出設置於跑道週邊多點感應元件所測得風場間之差異，當強度到達警告標準時，便會立即對相關航管人員發出警報。據悉目前松山及桃園國際機場已完成該系統架設，可藉由適時偵測並報告發生在離到場區域及其附近之風切危害，使航機安全更加強化。

雖然戰機在動力裝置及氣動外型設計方面與一般民航機有所差異，使其在遭遇低空風切時具有較強之應變能力，但對相關飛航作業人員而言，「多一層保障，就是多一分安全」；因此，未來若能在國內各軍用或軍

民合用機場內完成低空風切警報系統建置，相信可以將低空風切引發空難之機率大幅降低。

二、預報作業方面：

針對前述METAR/SPECI統計結果及個案分析資料所見情況，提出建議改善作法如后：

低空風切出現之確切時間及位置雖然難以預測，但統計馬公機場過去10年METAR/SPECI電碼出現低空風切個案資料可以發現，其天氣類型與對應之地面風場特徵間存在一定程度關聯；就比例上而言，以東北季風天氣類型之影響為最（好發風向為020~030；好發風速落在26kts及其附近），颱風及熱帶低壓影響時次之（好發風向為320~030；好發風速為24kts），冷鋒過境及滯留鋒面影響時再次之（冷鋒影響時之好發風向為020~040，且風速相對較大；滯留鋒面影響時之好發風向為210，且風速相對較小）；此外，偏南氣流雖也曾造成馬公機場發生低空風切，但過去10年來僅發生過乙例（佔所有個案2.63%）。馬公氣象預報人員應熟悉上述統計特徵，以作為未來預報低空風切之先備知識。

根據前述個案分析結果，在東北季風天氣系統影響下，JMA模式可以掌握到地面風速開始增強之趨勢；另外依據METAR/SPECI地面風速簡單移動平均值與低空風切

關聯性之表現，可以預期低空風切較有可能在地面風速增強過程中出現，並隨著地面風速的減弱而消失。

在偏南氣流個案中，背風渦旋實為真正影響馬公地區風場變化之原因，但因其風速微弱加上尺度較小，致使JMA模式無法準測預測。另外，觀察METAR/SPECI地面風之演變，可以發現穩定的北風在轉變成穩定的南風之前，會先經歷一個風速微弱且風向不定的階段，以及另一個時間較長的靜風狀態，而低空風切即是在風速微弱且風向不定的階段中發生。

上述徵候均可作為預報低空風切是否發生之依據，如能搭配短時逐筆之中尺度觀測分析資料，對於風場變化掌握亦有一定程度的助益；此外，若可取得高解析度探空模擬及預測資料，便能與個案所分析之垂直風場結構變化特徵進行比對，當情況相符時，預期出現低空風切之機會亦將有所提升。

陸、結論

透過本研究資料統計得知，引發馬公地區出現低空風切之天氣「類型」可區分為「東北季風」、「鋒面」、「颱風（熱帶低壓）」及「其他」等4類，且各天氣類型與對應之地面風場特徵間存在一定程度關聯。

在「鋒面」及「颱風（熱帶低壓）」天氣類型影響下，可多加利用都卜勒氣象雷達針

對低空風切進行風場觀測；唯為提升作業效能，建議可在現有資料及設備基礎上進行自動預警功能提升。另外，囿於雷達先天條件限制，建議可將剖風儀納入支援或規劃採購其他先進設備，以彌補其在「東北季風」及「其他」天氣類型條件下，或在無降水回波時之觀測罅隙；另透過個案分析可以發現，JMA模式、METAR/SPECI地面風場及探空資料之變化趨勢與低空風切發生之時機具有相當程度之關聯性（除JMA模式在偏南氣流個案中對風向變化掌握情況較差外）；據此，上述工具或可作為預報低空風切可能出現之參考依據，但若取得更高時（空）間解析度之分析及預測資料交互比對，方可進一步提升低空風切預報能力。

在統計馬公機場長達10年間、總計16萬9,644筆METAR/SPECI電碼中，低空風切資料僅出現393筆（佔總數0.23%）；且個案天數38天亦僅佔3653天（10年）1.04%。由於天氣室接獲塔台轉知低空風切訊息為馬公機場編報相關電碼之主要依據，因此，推測在無航機離到場之情況下，極有可能錯失編發低空風切電碼之機會。

另外，空軍氣象預報手冊當中已有律定，當預測機場將發生風切，使該基地主要機種低於飛行最低天氣限度時，須編發危險天氣傳報各單位。但囿於現行觀測低空風切現象能力有限，造成即使預報人員認為低空

風切將要發生，但卻經常無法以客觀觀測產品加以印證，導致「看不到、不取報」的結果，最終又回歸到被動接收航機通報低空風切訊息的作業模式。

為改善上述情況，完成低空風切常態自動觀測及預警系統之建置已成為無可避免的趨勢，否則除了所累積之資料庫將無法完全貼近低空風切真實面貌外；更有甚者，將對飛航安全造成直接危害。

最後，本研究所採用之資料統計及個案分析模式，或可作為未來探討其他氣象危險因子之研究架構；唯統計資料須達一定數量，且個案挑選需具有代表性或特別性，如此統計分析結果方能有效體現出該因子之本質。

柒、參考資料

- [1]童茂祥，2009。〈淺談低空風切警示系統〉，《2009 飛行安全冬季刊》，頁 63-68。
- [2]何台華、涂明聖、蒲金標、魏志憲，2005/6。〈2002 年梅雨季中正與松山機場低空風切之個案研究〉，《大氣科學》，第 33 期第 2 號，頁 120。
- [3]《飛航安全調查委員會_事故調查報告》，<https://www.asc.gov.tw/main_ch/docaccident.aspx?uid=219&pid=201&acd_no=99>
- [4]《香港天文台_由雷暴引起的微下擊暴流》<http://www.hko.gov.hk/aviat/amt/cause/microburst_c.htm>

[5] 《Manual on Low-level Wind Shear》

<<https://www.skybrary.aero/bookshelf/books/21194.pdf>

表1低空風切造成之飛安事故列表(摘錄)。

發生時間 (年/月/日)	事件經過
1975/6/24	東方航空編號第 66 號班機於紐約市甘迺迪國際機場受低空風切影響降落失敗，造成 112 人死亡和 12 人受傷。
1982/7/9	汎美航空編號第 759 號班機自路易斯安那州紐奧良市起飛，因遭遇低空風切起飛失敗而墜毀，造成機上 152 人死亡。
1983/9/28	臺灣航空公司所屬 BN-2 島嶼型飛機在蘭嶼附近遭遇不良天氣，導致航機失蹤。
1985/8/2	達美航空編號第 191 號班機在德克薩斯州達拉斯市降落，因遭遇低空風切導致降落失敗，造成 134 人不幸遇難。
1988/1/19	臺灣航空公司所屬 BN-2 島嶼型飛機在蘭嶼附近遭遇不良天氣，導致航機撞山墜毀。
1993/2/28	永興航空公司 DO-228 小型飛機自臺北飛往蘭嶼途中，於綠島與蘭嶼附近失事墜海，當時飛機處於鋒面帶上的低雲、惡劣能見度和極不穩定的氣流中。
1993/11/4	中華航空公司一架編號 B-165 的 B-747-400 型全新客機在香港啟德機場遭遇颱風環流引發的強風暴雨，飛機在 13 號跑道降落時衝出滑行道而落海，造成多人受傷，當時啟德機場確實出現風切，但無法立即發出預警。
1998/12/11	泰國國際航空 261 號班機，由曼谷前往泰國南部城市素叻他尼 (Surat Thani) 途中，在著陸時因受低空風切影響失速墜毀，造成機上 90 名乘客及 11 名機組員罹難。
1999/6/1	美國航空編號第 1420 號班機在阿肯色州小岩城遭遇低空風切降落失敗，造成 11 人死亡及 89 人受傷。

表2各風切個案對應天氣系統統計表。

天氣類型	天氣系統	發生日期 (年/月/日)	個案數
「東北季風」類型	東北季風減弱	2010/10/28 2017/11/5	2
	鋒面通過及東北季風增強	2014/12/8	1
	大陸冷氣團／大陸冷高壓	2014/12/22 2015/1/17	2
	大陸冷高壓減弱	2015/1/18	1
	東北季風及華南雲帶接近	2015/3/23	1
	強大大陸冷氣團(南下)及華南雲帶	2016/1/22 2018/1/31	2
	大陸冷氣團及華南雲帶	2016/2/1	1
	鋒面通過及強大大陸冷氣團南下	2016/2/14	1
	華南雲帶遠離及東北季風	2016/3/14	1
	微弱鋒面通過北部外海及東北季風	2016/10/9	1
	東北季風	2016/10/12 2016/11/28 2017/11/4	3
	東北季風增強	2017/12/16	1
	強大大陸冷氣團	2017/12/17 2018/2/3	2
	微弱東北季風	2018/2/23	1
分裂高壓出海	2018/2/26	1	
鋒面通過及大陸冷高壓	2018/3/8	1	

表2各風切個案對應天氣系統統計表(續)。

天氣類型	天氣系統	發生日期 (年/月/日)	個案數
「颱風(熱帶低壓)」類型	颱風雲系	2011/8/29 2012/8/1 2012/8/24 2013/9/21	4
	颱風外圍雲系	2012/7/31	1
	颱風環流遠離	2015/7/11	1
	颱風環流	2015/9/28	1
	颱風環流及雲系遠離	2016/9/28	1
	熱帶低壓	2018/8/23	1
「鋒面」類型	鋒面接近及其雲系	2016/1/28	1
	鋒面雲系	2016/1/29	1
	鋒面接近及通過	2017/3/31	1
	滯留鋒面	2017/6/3	1
「其他」類型	偏南氣流	2018/5/5	1
	滯留鋒面及熱帶低壓外圍環流	2018/6/15	1
	東北季風及颱風外圍環流	2018/11/1	1
備註	<p>1.由於不同個案大陸冷氣團南移時序、強度程度、水氣含量多寡、高低層系統配置差異等因素，本表中即使在同屬「東北季風」乙類天氣類型下，仍可區分各種不同之天氣系統。</p> <p>2.統計馬公機場 METAR/SPECI 附加電碼編報低空風切資料中，在同一天內或有持續性發生(每兩次電碼時間間隔小於或等於30分鐘)、或有間歇性發生(停止超過30分鐘以上後再發生)；在本研究中，無論持續或間歇性發生，凡於同一日內發生之低空風切，因屬同一天氣系統，故均視為同一個案。</p>		

表3 2017年11月4日個案當日探空500公尺以下平均風向(速)統計表(近似值)。

時間 項目 高度 (m)	2017/11/4/0800L		2017/11/4/2000L	
	平均風向 (360° 方位角)	平均 風速 (kts)	平均風向 (360° 方位角)	平均 風速 (kts)
SFC				
 100	030	29	030	32
 200	030	34	035	41
 300	035	39	035	47
 400	035	44	035	50
 500	040	48	035	52

表4 2018年5月5日個案當日探空500公尺以下平均風向(速)統計表(近似值)。

時間 項目 高度 (m)	2018/5/5/0800L		2018/5/5/2000L	
	平均風向 (360° 方位角)	平均 風速 (kts)	平均風向 (360° 方位角)	平均 風速 (kts)
SFC				
 100	020	8.1	315	2.8
 200	020	5.3	240	4.6
 300	005	4.5	225	6
 400	335	3.9	215	8.1
 500	290	4.5	205	10.7

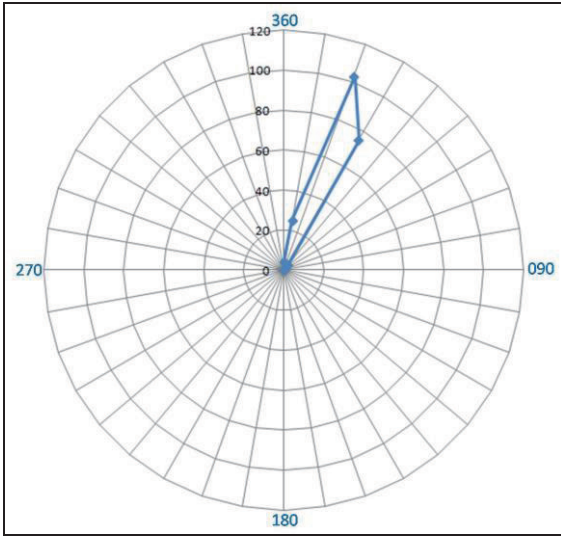


圖 1(a)「東北季風」天氣類型造成低空風切時，地面風向對應出現風切資料筆數分布圖。

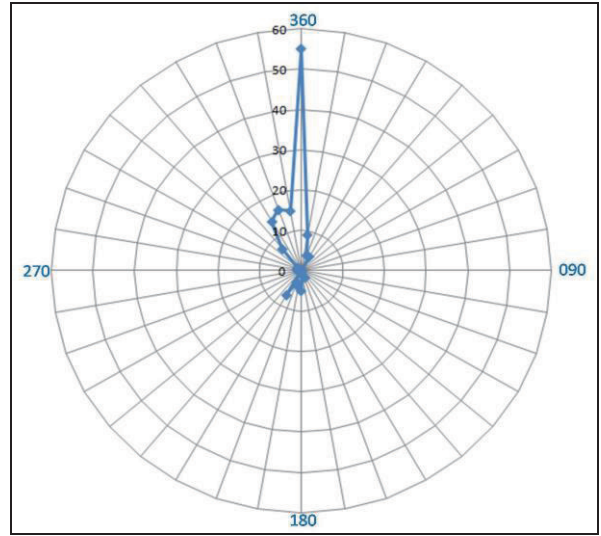


圖 2(a)「颱風(熱帶低壓)」天氣類型造成低空風切時，地面風向對應出現風切資料筆數分布圖。

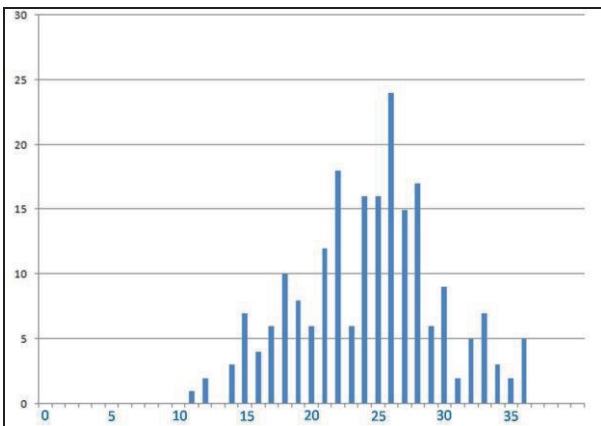


圖 1(b)「東北季風」天氣類型造成低空風切時，地面平均風速對應出現風切資料筆數分布圖。

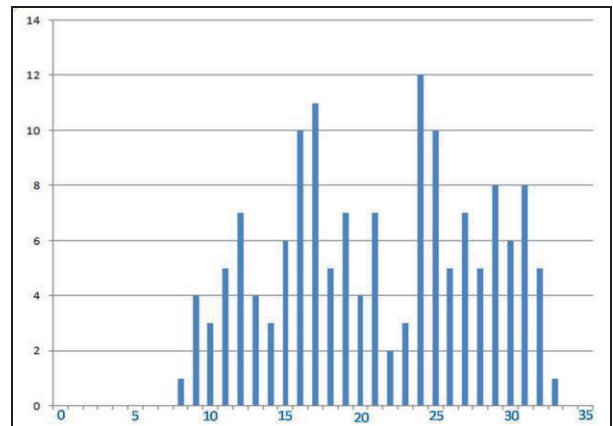


圖 2(b)「颱風(熱帶低壓)」天氣類型造成低空風切時，地面平均風速對應出現風切資料筆數分布圖。

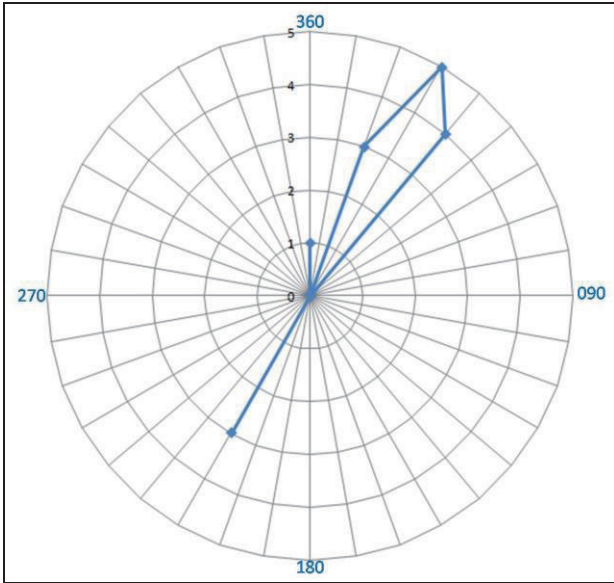


圖 3(a)「鋒面」天氣類型造成低空風切時，地面風向對應出現風切資料筆數分布圖。

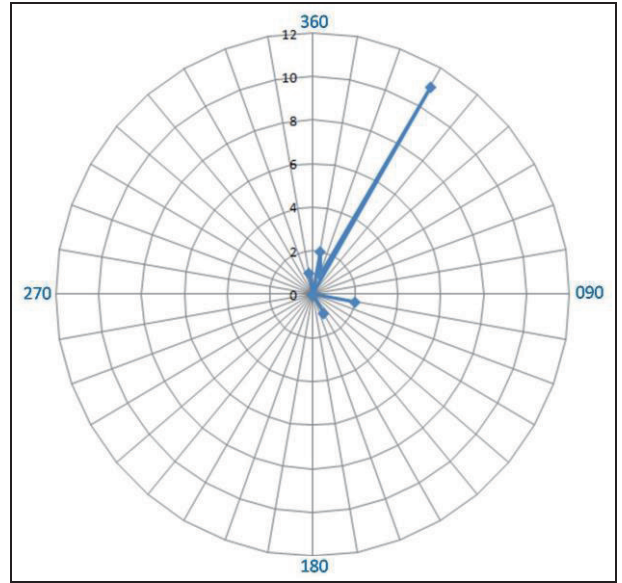


圖 4(a)「其他」天氣類型造成低空風切時，地面風向對應出現風切資料筆數分布圖。

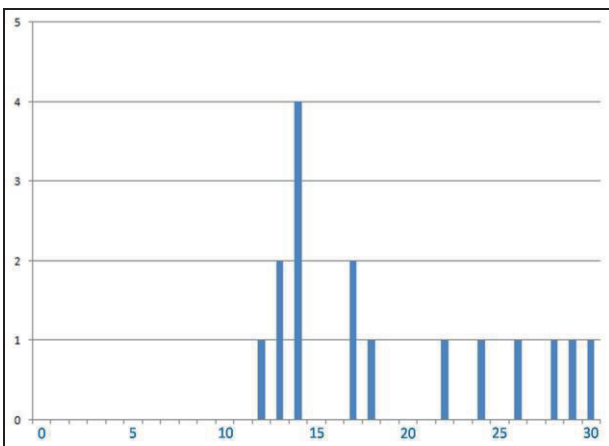


圖 3(b)「鋒面」天氣類型造成低空風切時，地面平均風速對應出現風切資料筆數分布圖。

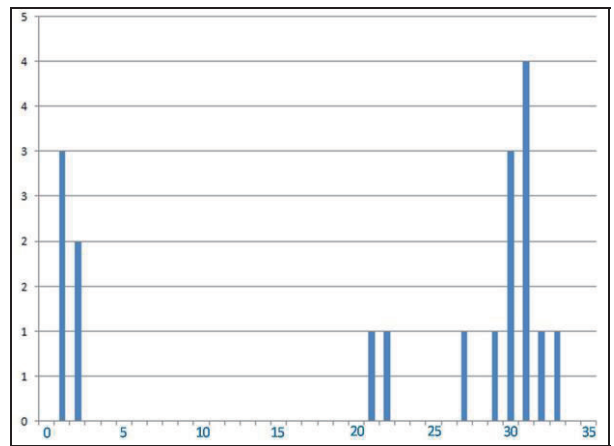


圖 4(b)「其他」天氣類型造成低空風切時，地面平均風速對應出現風切資料筆數分布圖。

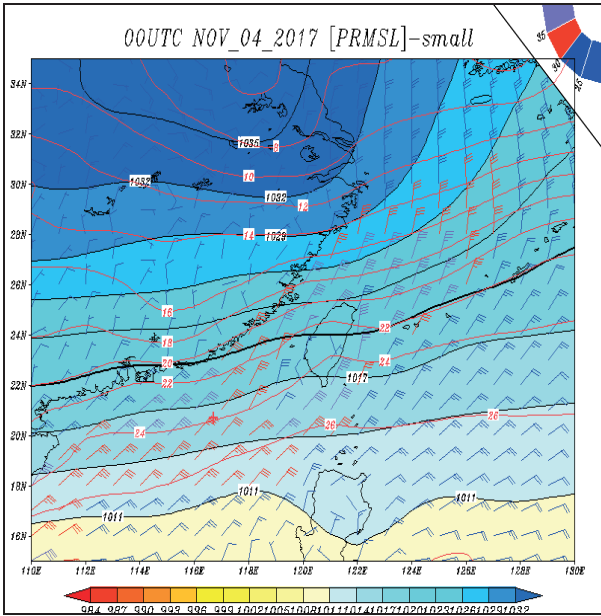


圖 5(a) 2017 年 11 月 4 日 00UTC 臺灣地區地面天氣分析圖。

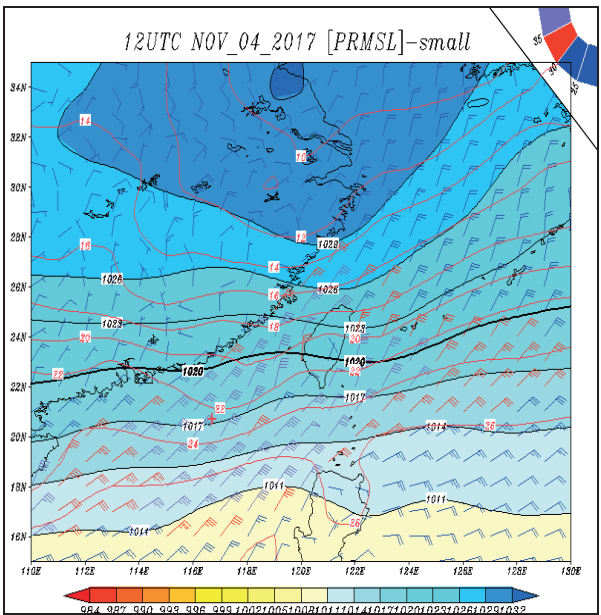


圖 5(b) 2017 年 11 月 4 日 12UTC 臺灣地區地面天氣分析圖。

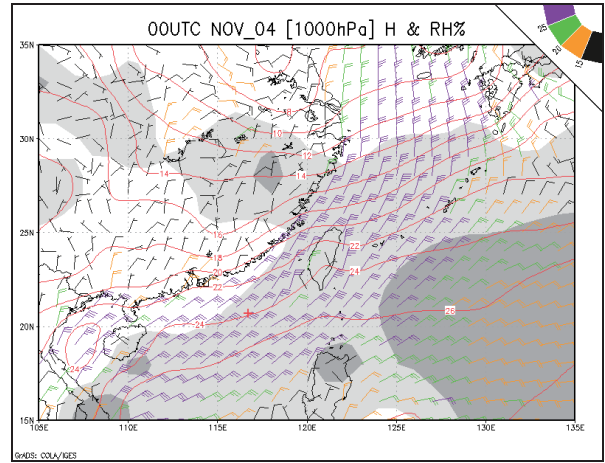


圖 6(a) 2017 年 11 月 4 日 00UTC 臺灣地區 1000hPa 天氣分析圖。

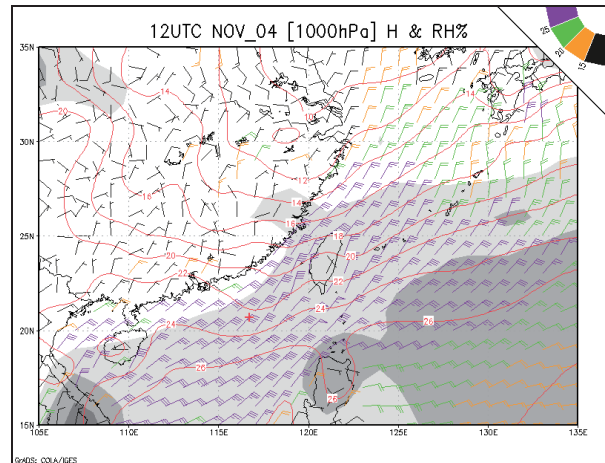


圖 6(b) 2017 年 11 月 4 日 12UTC 臺灣地區 1000hPa 天氣分析圖。

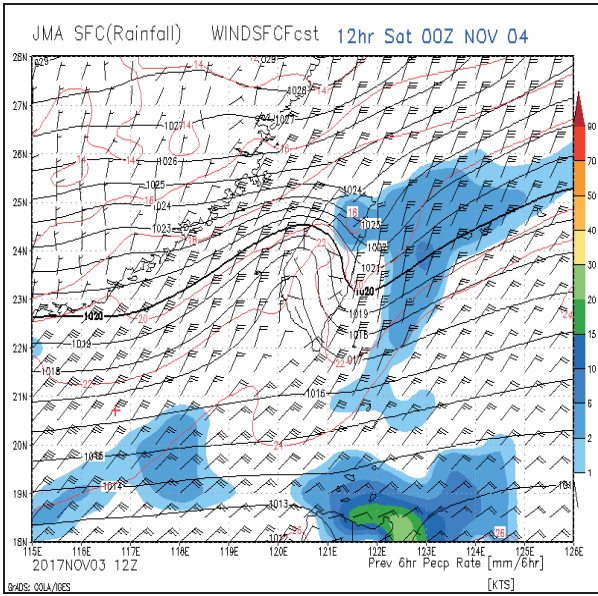


圖 7(a) JMA 預測 2017 年 11 月 4 日 00UTC

地面天氣圖。

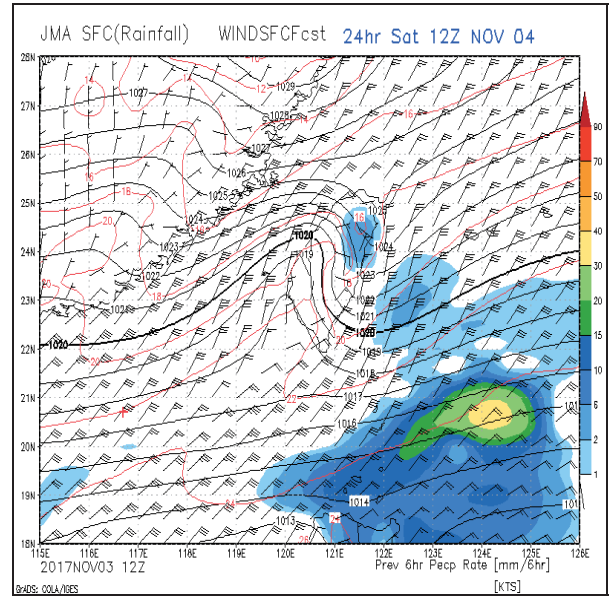


圖 7(c) JMA 預測 2017 年 11 月 4 日 12UTC

地面天氣圖。

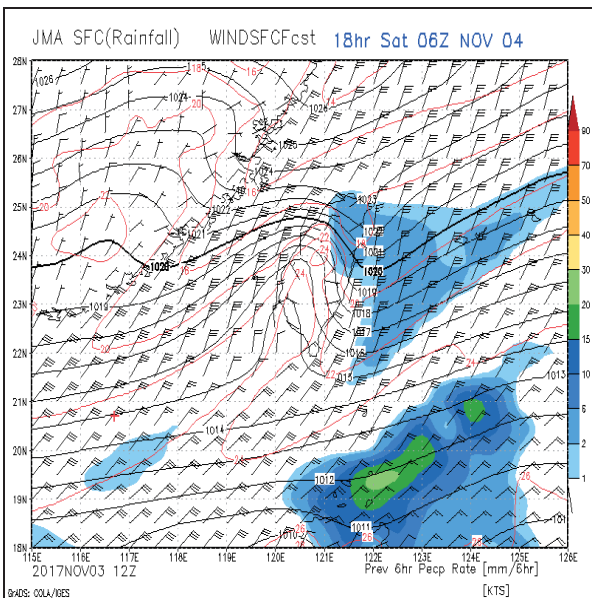


圖 7(b) JMA 預測 2017 年 11 月 4 日 06UTC

地面天氣圖。

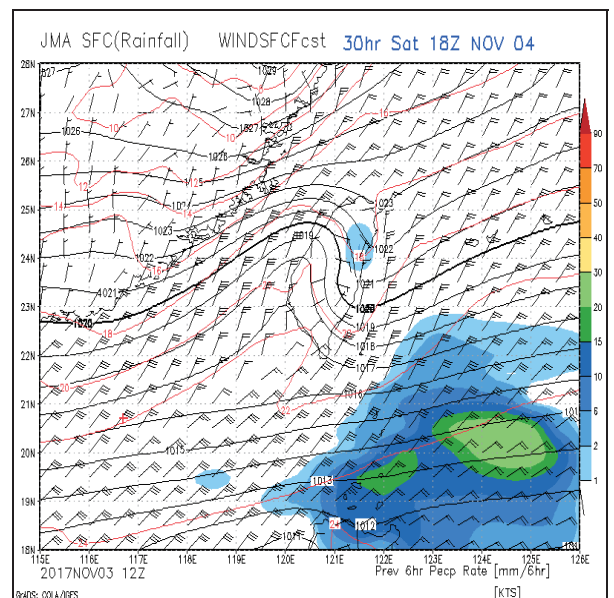


圖 7(d) JMA 預測 2017 年 11 月 4 日 18UTC

地面天氣圖。

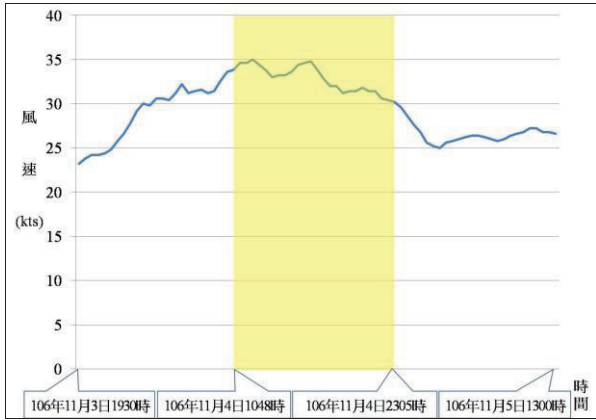


圖 8 2017 年 11 月 4 日個案低空風切發生前、中、後平均風速簡單移動平均圖 (圖中黃色陰影區域為低空風切發生時段)。

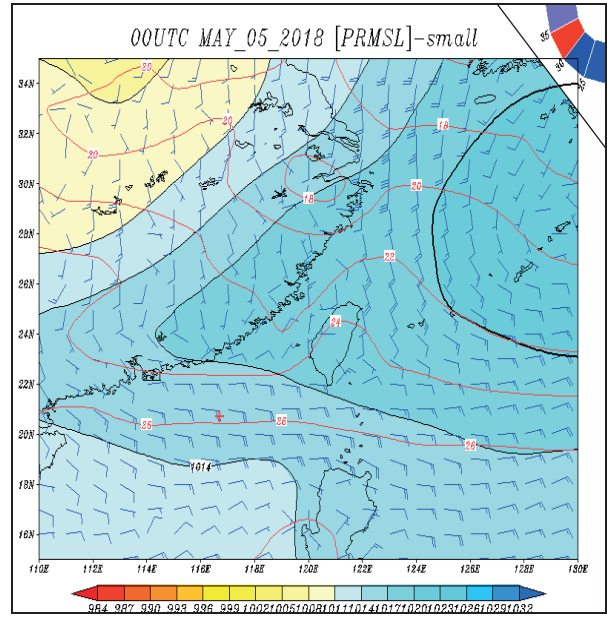


圖 9(a) 2018 年 5 月 5 日 00UTC 臺灣地區地面天氣分析圖。

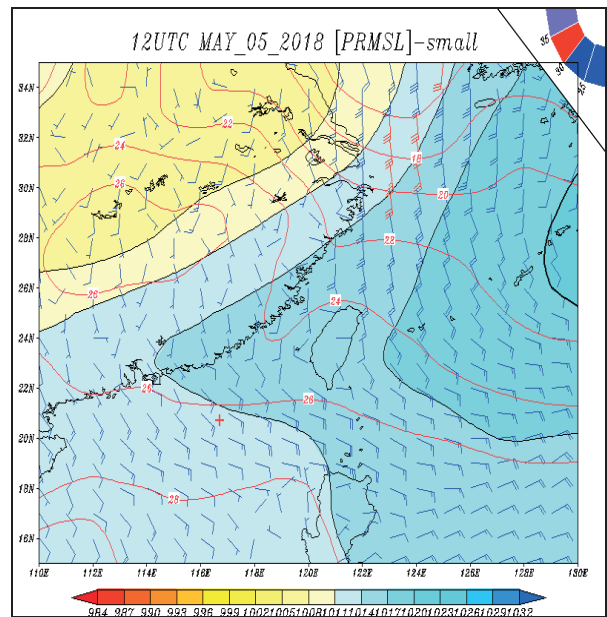


圖 9(b) 2018 年 5 月 5 日 12UTC 臺灣地區地面天氣分析圖。

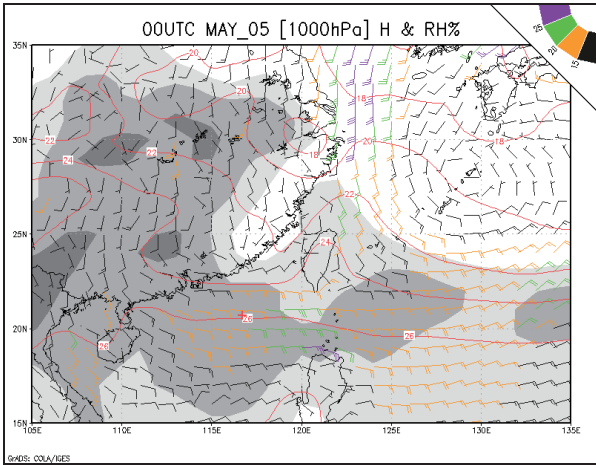


圖 10(a) 2018 年 5 月 5 日 00UTC 臺灣地區
1000hPa 天氣分析圖。

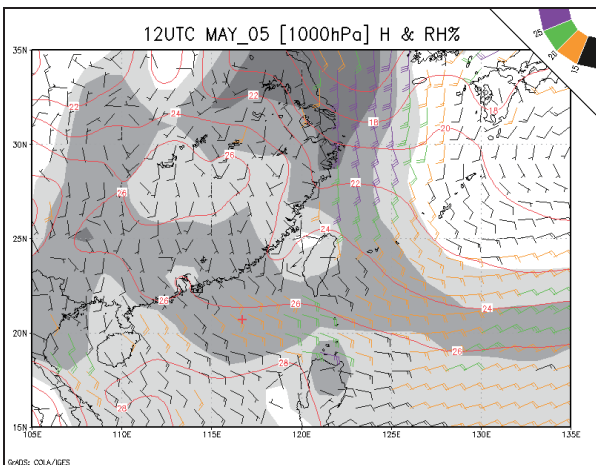


圖 10(b) 2018 年 5 月 5 日 12UTC 臺灣地區
1000hPa 天氣分析圖。

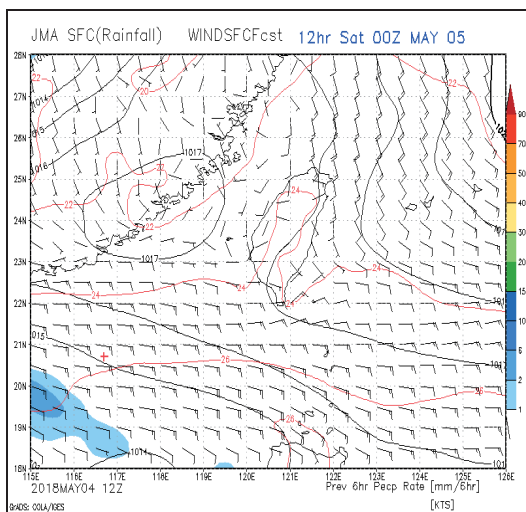


圖 11(a) JMA 預測 2018 年 5 月 5 日 00UTC
地面天氣圖。

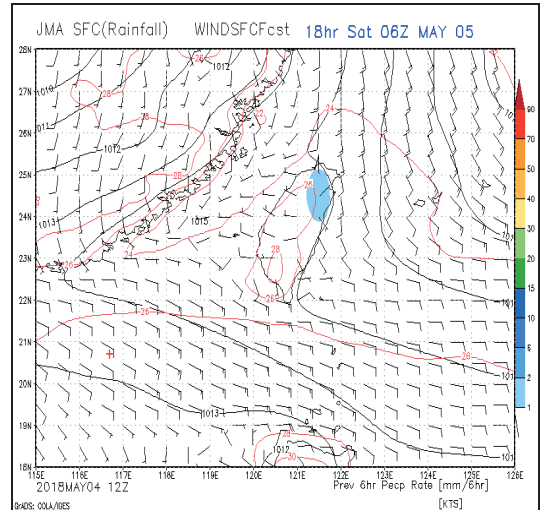


圖 11(b) JMA 預測 2018 年 5 月 5 日 06UTC
地面天氣圖。

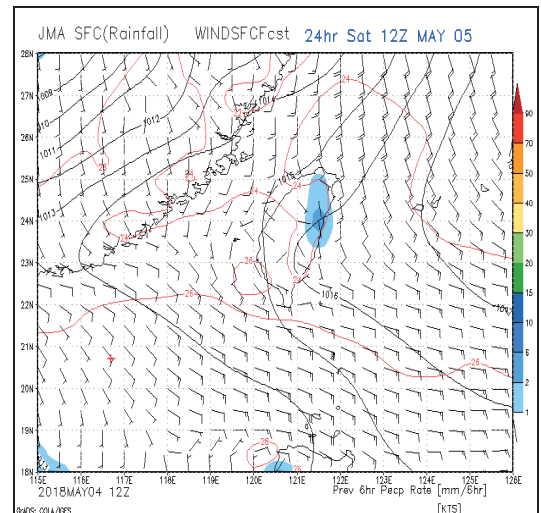


圖 11(c) JMA 預測 2018 年 5 月 5 日 12UTC
地面天氣圖。

